

УПРОЩЕННЫЕ СХЕМЫ ИНЖЕКЦИИ И СМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В БЕТАТРОНЕ

В. М. РАЗИН

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Если частота питания зарядного трансформатора в схемах инжекции и смещения равна (или кратна) частоте тока, питающего электромагнит бетатрона, то представляется возможным зарядную часть схем построить без применения вентильного элемента (рис. 1). Этим достигается значительное упрощение схем. Расчет подобных схем может быть произведен на основании следующих теоретических рассуждений.

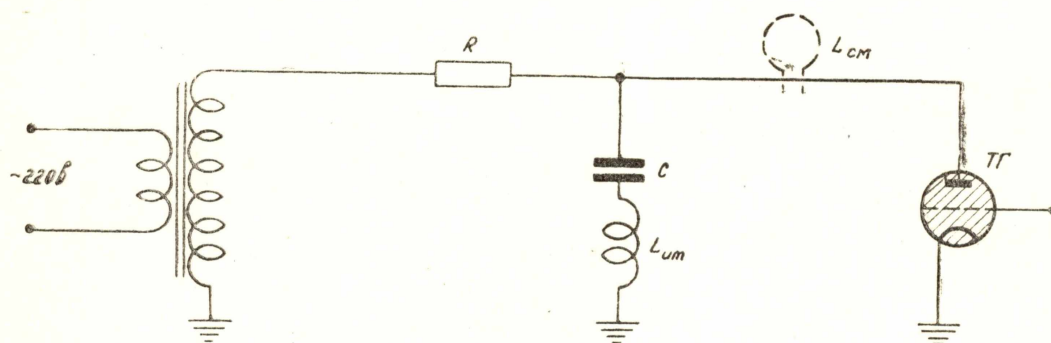


Рис. 1

Будем считать, что частота повторения импульсов в разрядной части схемы равна частоте питания всей схемы. Тогда процессы в зарядной части схемы будут протекать следующим образом. В течение каждого периода зарядного тока напряжение на емкости достигает величины U_{cx} при определенной фазе. В этот момент, в результате генерации импульса в разрядной части цепи схемы, напряжение на емкости становится равным $-kU_{cx}$, где k — коэффициент, характеризующий потери разрядной цепи. Очевидно $0 < k < 1$.

Таким образом, в течение каждого периода имеет место переходный процесс в цепи из последовательно включенной емкости включаемой под напряжение зарядного трансформатора $u = U_m \sin(\omega t + \phi)$ при одной и той же фазе α и сопротивления, выполняющего функции токоограничивающего и разделительного элемента. В начале переходного процесса напряжение на емкости равно $-kU_{cx}$, в конце равно $+U_{cx}$. Переходный процесс в цепи из последовательно соединенных сопротивления R и ем-

кости C при включении в момент $t=0$ напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$, как известно [1], описывается уравнением:

$$U_c = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

где u_c — напряжение на емкости,

ω — круговая частота питающего напряжения,

$$I_m = \frac{U_m}{z}; \quad z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{1}{\omega C R}\right); \quad \tau = RC.$$

A — постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий. В нашем случае мы имеем в момент $\omega t = \alpha$, $u_c = -kU_{cx}$, т. е.

$$-kU_{cx} = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\alpha + \psi - \varphi) + Ae^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}}, \quad (2)$$

в момент $\omega t = \alpha + 2\pi$, $u_c = U_{cx}$, т. е.

$$U_{cx} = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\alpha + \psi - \varphi) + Ae^{-\frac{\alpha + 2\pi}{\omega\tau}}. \quad (3)$$

Решая совместно (2) и (3), получим:

$$U_{cx} = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\alpha + \psi - \varphi) \frac{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}}{1 + ke^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}}, \quad (4)$$

$$A = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\alpha + \psi - \varphi) \frac{1 + k}{(1 + ke^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}) e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}}}. \quad (5)$$

Следовательно,

$$u_c = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{I_m}{\omega C} \cos(\alpha + \psi - \varphi) \frac{1 + k}{(1 + ke^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}) e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}}} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6)$$

Выражение (4) позволяет определить напряжение на емкости в момент генерации импульса в разрядной цепи, а выражение (6) определяет характер изменения напряжения на аноде коммутирующего тиратрона. Найдем характер изменения тока в зарядной цепи схемы:

$$i = C \frac{du_c}{dt} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{I_m}{\omega\tau} \cos(\alpha + \psi - \varphi) \frac{1 + k}{1 + ke^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}} \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}}}. \quad (7)$$

Среднее значение тока:

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+2\pi} id(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} \cos\left(\alpha + \psi - \varphi\right) \frac{1+k}{1+ke^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}} \times \\ \times \left(e^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}} - 1\right). \quad (8)$$

Эффективное значение тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+2\pi} i^2 d(\omega t)} = \\ = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \left[1 + \frac{\cos^2(\alpha + \psi - \varphi)}{2\pi\omega\tau} \left(\frac{1+k}{1+ke^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{4\pi}{\omega\tau}} \right) \right]^{1/2}. \quad (9)$$

На основании полученных соотношений расчет зарядного трансформатора производится известными методами [2]. Коэффициент полезного действия зарядной цепи определяется следующим образом. Мощность, рассеиваемая в активном сопротивлении зарядной цепи:

$$P_1 = I^2 R. \quad (10)$$

Полезная мощность:

$$P_2 = \frac{\omega}{2\pi} \frac{CU_{cx}^2 (1+k)^2}{2}. \quad (11)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \leq 0,5. \quad (12)$$

Величина сопротивления R определяется на основании следующих соображений. После окончания импульса в разрядной цепи напряжение на емкости, будет изменяться по закону

$$u_c \cong U_m + A_1 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (13)$$

В момент

$$t=0; \quad u_c = -kU_{cx},$$

т. е.

$$-kU_{cx} = U_m + A_1,$$

откуда

$$A_1 = -kU_{cx} - U_m.$$

Следовательно,

$$U_c = U_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - kU_{cx} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

или

$$U_c = U_m \left[1 - \left(1 + \frac{kU_{cx}}{U_m} \right) e^{-\frac{t_x}{\tau}} \right].$$

Момент времени, когда напряжение на емкости станет равным нулю, определяется из соотношения:

$$U_m \left[1 - \left(1 + \frac{kU_{cx}}{U_m} \right) e^{-\frac{t_x}{\tau}} \right] = 0,$$

откуда

$$t_x = \tau \ln \left(1 + \frac{kU_{cx}}{U_m} \right). \quad (14)$$

Последнее соотношение позволяет вычислить τ , если известно t_x . Для обеспечения нормальной работы тиратрона в импульсном режиме необходимо выполнить с некоторым запасом приближенное неравенство $t_x > t_g$, где t_g — время деионизации тиратрона. Это необходимо для того, чтобы за время действия отрицательного напряжения на аноде тиратрона успело восстановиться управляющее действие сетки.

Некоторый расчетный запас имеется в соотношении (13), где предполагается, что после импульса в разрядной цепи напряжение на емкости будет стремиться к U_m . В действительности это установившееся напряжение при определенных фазовых соотношениях в схеме будет меньше U_m и, следовательно, действительное значение t_x будет больше расчетного, определенного из (14).

Примеры расчета. Схема инжекции

Для схемы инжекции характерны следующие значения входящих в расчетные уравнения величин

$$C = 0,1 \div 0,2 \text{ мкф}; U_{cx} \cong 3000 \text{ в}, k \cong 0,1 \div 0,2.$$

Принимая для приближенного расчета $t_x \cong 10^{-4} \text{ сек}$, $U_{cx} \cong U_m$ найдем из (14):

$$\tau = \frac{t_x}{\ln \left(\frac{1 + kU_{cx}}{U_m} \right)} \cong \frac{t_x}{\ln(1 + k)} \cong \frac{t_x}{k} = 10^{-3} \text{ сек}.$$

Тогда

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{10^{-3}}{0,1 \div 0,2} 10^{-6} = (5 \div 10) 10^3 \text{ ом}.$$

Величина $e^{-\frac{2\pi}{\omega\tau}}$, входящая в расчетные уравнения, при $\omega = 314$, $\tau = 10^{-3} \text{ сек}$

будет равна $e^{-\frac{2\pi}{0,314}} = e^{-20} \cong 0$.

По этой причине расчетные формулы значительно упрощаются.

Учитывая, что

$$I_m = \frac{U_m \omega C}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}},$$

уравнение (4) запишем в виде

$$U_{cx} \cong - \frac{U_m}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \cos(\alpha + \psi - \varphi).$$

Если зарядный трансформатор питается напряжением, синфазным напряжению на электромагните бетатрона, то должно быть выполнено равенство

$$\alpha + \psi = \frac{\pi}{2},$$

так как инжекция электронов в бетатрон происходит при максимальном значении напряжения на обмотке электромагнита.

Следовательно,

$$U_{cx} = - \frac{U_m}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin \varphi.$$

Учитывая, что $\varphi = \arctg \left(\frac{-1}{\omega \tau} \right)$, получим $\sin \varphi = \frac{-1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$ и

$$U_{cx} = \frac{U_m}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

при $\omega = 314$, $U_m \cong 1,1 U_{cx}$, т. е. $U_m \cong 3300$ в.

Среднее значение тока в зарядной цепи, с учетом написанных соотношений, определится из (8):

$$I_o = \frac{I_m}{2\pi} \frac{1+k}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \cong \frac{I_m}{2\pi}.$$

Так как

$$I_m = \frac{U_m \omega C}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} = \frac{3300 \cdot 314 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}{1,05} \cong 0,2 \text{ а},$$

то

$$I_o = \frac{0,2}{2\pi} \cdot \frac{1,1}{1,05} \cong 0,033 \text{ а}.$$

Эффективный ток зарядной цепи из (9):

$$I \cong \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{(1+k)^2}{2\pi \omega \tau (1 + \omega^2 \tau^2)}} \cong 0,9 I_m = 0,18 \text{ а}.$$

Коэффициент трансформации:

$$n = \frac{U_m}{U_{m1}} = \frac{3300}{220 \sqrt{2}} = 10,6.$$

Эффективный ток сетевой обмотки:

$$I_1 = n \sqrt{I^2 - I_o^2} \cong 1,9 \text{ а}.$$

Расчетная мощность зарядного трансформатора:

$$P = \frac{U_{m1} I_1 + U_m I}{2 \sqrt{2}} \cong 420 \text{ в а}.$$

Мощность потерь:

$$P_1 = I^2 R = 0,18^2 \cdot 5000 \cong 160 \text{ вт.}$$

Полезная мощность:

$$P_2 = \frac{\omega}{2\pi} \frac{C U_{cx}^2 (1+k)^2}{2} \cong 55 \text{ вт.}$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \cong 0,25.$$

Коэффициент полезного действия может быть повышен, если применить зарядку емкости через индуктивность, однако применение такого способа для схемы инжекции не следует считать целесообразным ввиду возможности возникновения перенапряжений на аноде коммутирующего тиратрона при ненормальной работе схемы. Мощность, потребляемая зарядным трансформатором схемы инжекции из сети, обычно невелика, поэтому низкое значение коэффициента полезного действия в этом случае оказывается вполне допустимым.

Схема смещения

Зарядная цепь схемы смещения отличается от соответствующей цепи схемы инжекции иным соотношением фаз процессов зарядки и разрядки, а также другими величинами параметров цепи. Так, в большинстве практических случаев для смещения электронов с равновесной орбиты на мишень в бетатронах на энергии 15—25 Мэв требуется емкость, разряжаемая на витки смещающей обмотки, порядка нескольких мкф при напряжении на ней порядка 2—3 кв. Для зарядки емкости может быть использована такая же цепь (рис. 1), как и в схеме инжекции.

Для целей зарядки емкости в этом случае целесообразно использовать напряжение, отстающее на 60 электрических градусов от напряжения на электромагните. Такое соотношение фаз не трудно получить при наличии трехфазной сети питания. Следовательно, напряжение зарядного трансформатора должно изменяться по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t - 60^\circ), \text{ т. е. } \psi = 60^\circ.$$

Сброс электронов обычно осуществляется в момент времени, соответствующий углу в 75 эл. град. после момента инжекции, т. е. $\alpha = 90^\circ + 75^\circ = 165^\circ$.

Для упрощения выкладок перенесем начало координат в точку, где $\psi = 0$ и $\alpha = 165^\circ - 60 = 105^\circ$.

Используя приведенные выше соотношения, произведем примерный расчет схемы смещения для параметров

$$C = 2 \text{ мкф}; U_{cx} = 2000 \text{ в}; k = 0,6; \alpha = 1,83.$$

Из условия (14):

$$\tau = \frac{t_x}{\ln \left(1 + \frac{k U_{cx}}{U_m} \right)}.$$

Принимая по-прежнему для приближенного расчета

$$t_x = 10^{-4} \text{ сек}, U_{cx} \cong U_m,$$

получим $\tau \cong 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$, откуда $R = \frac{\tau}{C} \cong 100 \text{ ом}$.

Параметр $\omega\tau = 0,067$, следовательно, и в этом случае можно воспользоваться приближенным выражением, как и в случае расчета схемы инъекции.

Напряжение на емкости:

$$U_{cx} = - \frac{U_m}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \cos(\alpha - \varphi).$$

В нашем случае

$$\varphi = \arctg\left(\frac{-1}{\omega\tau}\right) \cong -\frac{\pi}{2}.$$

Следовательно,

$$\cos(\alpha - \varphi) = -\sin\alpha = -\sin 105^\circ = -0,97$$

$$U_{cx} \cong 0,97 U_m, \text{ так как } \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} \cong 1.$$

Получаем $U_m = \frac{U_{cx}}{0,97} \cong 2060 \text{ в.}$ В приближенном расчете

можно принять $U_{cx} \cong U_m = 2000 \text{ в.}$

Среднее значение тока:

$$I_0 = - \frac{I_m}{2\pi} \cos(\alpha - \varphi) (1 + \kappa) \cong 0,3 a,$$

где

$$I_m = \frac{U_m \omega C}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \cong U_m \omega C = 1,25 a.$$

Эффективный ток зарядной цепи:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\cos^2(\alpha - \varphi) (1 + \kappa^2)}{2\pi \omega\tau}} \cong 2,3 a.$$

Коэффициент трансформации:

$$n = \frac{U_m}{U_m} \cong 6,4.$$

Эффективный ток сетевой обмотки:

$$I_1 \cong nI = 14,7 a.$$

Полезная мощность:

$$P_2 \cong \frac{\omega}{2\pi} \frac{CU_{cx}^2 (1 + \kappa)^2}{2} \cong 512 \text{ вт.}$$

Мощность потерь:

$$P_1 \cong I^2 R \cong 536 \text{ вт.}$$

Коэффициент полезного действия: $\eta \cong 0,48$.

Расчетная мощность трансформатора:

$$P \cong I_1 U_1 \cong 3250 \text{ в} \cdot \text{а}.$$

Для зарядной цепи в схеме с применением газотрона при тех же значениях величин C , U_m , R и k получаем:

$$P = 670 \text{ в} \cdot \text{а}, P_1 = 27,5 \text{ в} \cdot \text{т}, P_2 + P_1 = 512 \text{ в} \cdot \text{т}, \eta = 0,95.$$

Следовательно, отказ от применения газотрона приводит в этом случае к значительному увеличению размеров зарядного трансформатора и к снижению коэффициента полезного действия, что не следует считать целесообразным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калантаров П. Л. и Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1951.
2. Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи. ч. 1, Госэнергоиздат, 1950.